

Das ist nur . . . Entropie, sagte er,
glaubte damit alles erklärt zu haben
und wiederholte einigemal das seltsame Wort.

Karel Čapek (Krakatit, 1924)

Liebe Leserin, lieber Leser,

was halten Sie von Reibung? Meistens stört sie. Bewegung macht sie unter Wärmeentwicklung irreversible zunichte. Die Wärme wird zerstreut (dissipiert). Dennoch wäre der Alltag (und erst recht die molekulare Maschinerie in den Körperzellen) ohne sie nicht meisterbar. Auch das himmlische Geschehen braucht energetische „Zerstreuung“. Sie erst gibt, da unumkehrbar, eine Zeitrichtung vor. Singen wir also das „Hohelied der Reibung“! Unter Reibung wollen wir alles verstehen, was Energie zerstreut, sprich die Unordnung (Entropie) erhöht. Sogar „stellardynamische Reibung“, die keinerlei Wärme hinterlässt, steigert die universale Unordnung.

Mitte Februar kommt uns ein Miniasteroid auf ein Zehntel des Mondabstandes nahe. Die Stippvisite von „2012 DA 14“ am 15. Februar gegen 20 Uhr 26 ist unspektakulär. Der Brocken ist leider zu klein (50 m, 7te Größe) als dass er mit bloßem Auge zu erfassen wäre und zu schnell (bis zu 1°/min) als dass man ihn so einfach verfolgen könnte.

Eine fröhlich-närrische Zeit wünscht

Hans-Erich Fröhlich

Der Himmel im Februar

Merkur gewährt um die Monatsmitte eine Abendsichtbarkeit. Seinen größten östlichen Winkelabstand zur Sonne (18°) erreicht er am 16. Februar.

Jupiter bewegt sich wieder rechtläufig am Himmel. Er geht am Monatsende gegen zwei Uhr in der Frühe unter. Da ist Saturn schon 2 1/2 Stunden auf den Beinen. Ab dem 19. bewegt der sich rückläufig. Damit kündigt sich seine Opposition Ende April an.

Kosmos mit Reibung

Reibung entwertet. Auf molekularer Ebene bedeutet dies Produktion von Wärme, also von Zufallsbewegung. Der Zufall, einmal da, lässt sich (ohne Aufwand) nicht mehr zurücknehmen. Das „Zufällige und Ungefähre“, es nimmt zu in der Welt! Dies allein, die Zunahme der Entropie, so Sir Arthur Eddington (1882–1944), verleihe der Zeit eine Richtung. Die physikalischen Elementarvorgänge tun es nicht. Sie sind (fast) ausnahmslos zeitsymmetrisch. Dass die Zeit voranschreitet, macht sich dadurch bemerkbar, dass man eine Uhr aufziehen bzw. die Batterie wechseln muss, um die Energie, die sich klammheimlich davon gemacht hat, wieder zu ersetzen. (Einem idealen Pendel wäre es egal, in welche Richtung¹ Eddingtons „Zeitpfeil“ weist.)

Kennt der Kosmos Reibung? Frühere Zeiten wären über die Frage entsetzt gewesen, sahen sie doch in der Mechanik des Himmels ein reibungslos laufendes Uhrwerk. Undenkbar, dass dieses „Werk“ stehenbleibt. Reibung gehörte in die sublunare Sphäre, wo das Unvollkommene haust. Jenseits des Mondes ergeht man sich „nach ewigen, ehernen, großen Gesetzen“ in Kreisen. Man muss schon, wie der große Edmond Halley (1656–1742), genau hinschauen, um im planetaren Räderwerk Reibung auszumachen – Gezeitenreibung. Rotationsenergie der Erde wird durch das ewige Gezerre von Mond und Sonne zu Wärme. Der Energieumsatz² ist nicht der Rede wert. Er entspricht der elektrischen Leistung der Menschheit! Die Reibung am Erdkörper „vernichtet“ zwar Rotationsenergie – die Tage werden länger! –, aber nicht vollständig! Etwas davon wird in die Bahnbewegung des Mondes investiert. Der entfernt sich jährlich um 4 cm von der Erde. Dauert der „Tag“ länger als der „Monat“ oder rotiert ein Planet gar anders herum als sich sein Mond um ihn bewegt, Kommt's zum Teufelskreis: Reibung führt zu noch mehr Reibung. Solch ein Mond nähert sich immer schneller seinem Planeten. Triton, der größte unter den Neptuntrabanten, ist ein solcher Absturz kandidat.

Und das Zentralgestirn, die Sonne? Eine Zeit lang glaubte man, sie leuchtete, weil andauernd etwas in sie hineinfiel. Wie bei Sternschnuppen: Aufheizung durch Reibung. In ihren Kindertagen mag das eine Rolle gespielt haben.

¹Filmen Sie über einen längeren Zeitraum eine Pendeluhr und schauen Sie sich den Film rückwärts (und wegen des Ziffernblattes seitenverkehrt) an! Das einzige, was stutzen macht, ist, dass das Aufzugsgewicht wie von Geisterhand gezogen nach oben wandert.

²Gezeitenkraftwerke könnten den Weltenergiebedarf nicht decken. Ein Abbau der Gezeiten wäre ökologisch bedenklich. Der Mond sorgt für den lebensnotwendigen Austausch in den Tiefen der Ozeane.

Heutzutage ersetzt die Sonne ihre Strahlungsverluste durch Kernfusionsenergie. Der Energiestrom aus dem heißen Sonneninnern, aufgesaugt von der Weltraum„kälte“, wird in der Sonnenhülle konvektiv transportiert. Am Boden der Brodelzone herrschen zwei Millionen Grad, oben 6000. Dank dieses Gefälles kann dem Energiestrom mechanische Arbeitsleistung entnommen werden. Diese Wärmekraftmaschine unterhält die differentielle Rotation, die mit viel Reibung einhergeht, und treibt einen selbsterregten (Siemensschen) Sonnendynamo. Subkutan werden magnetische Felder verstärkt, die zyklisch eine Reihe von Aktivitäten an der Sonnenoberfläche und darüber entfalten. Bei der Vernichtung der magnetischen Felder bzw. der sie hervorrufenden elektrischen Ströme entsteht Ohmsche Wärme.

Auch wenn der Kosmos-Bote zurecht meint, wir lebten von der Entropiearmut des Sonnenlichts, so ist „Armut“ ein relativer Begriff. Das Sonnenlicht, das die Pflanzen nutzen, wurde bereits beim Transport durch die Sonnenkugel nach draußen fast völlig entwertet! Wir nutzen bloß den Restwert. Eigentlich schade, dass die Arbeitsfähigkeit des Sonnenlichts ungenutzt verpufft. Das allermeiste geht ja an der Erde und den übrigen Planeten vorbei! Die Sonne ist wie eine Kerze, die bloß die Dunkelheit erhellt, anstatt *nebenbei* noch den Teepot warmzuhalten oder eine kleine Wärmekraftanlage zu betreiben. Alle Sterne sind Verschwender. Ihr Leuchten kann nicht zurückgenommen werden. Dennoch: Verglichen damit, was an Zufall bereits in der kosmischen Hintergrundstrahlung steckt, vermehren die Sterne durch ihr Leuchten nicht wesentlich die Entropie des Universums.

Bleiben wir bei der Sonne. Sie ist vor 4,6 Milliarden Jahren spontan aus einer interstellaren Molekülwolke hervorgegangen. Damit war ein Entropieschub verbunden. Ein Gedankenexperiment: Gegeben eine Kugel, Lichtmonate groß, bestehend aus Partikeln, die – zunächst – nur vermittels Schwerkraft untereinander wechselwirken mögen, also stoßfrei, was wichtig ist. Denken Sie an Neutrinos! Eine solche kugelförmige Teilchenwolke stürzt, da nicht vom Drucke gehalten, im freien Fall in sich zusammen. Im Idealfall, bei homogener Kugel, bleibt die Kugel eine Kugel. Sie schnurrt immer schneller zusammen – zu einem Punkt unendlicher Dichte³. Doch dabei bliebe es nicht! Da ist nichts, was den Schwung aufhielte! Die Teilchen fielen einfach durch den Kugelmittelpunkt hindurch. Eine Neutrinowolke blähte sich wieder zur anfänglichen Größe auf. Danach begänne das Spiel von neuem. Ohne Reibung

³Bei einem kollabierenden Ellipsoid „verbreiterte“ sich der Punkt zu einer Linie bzw. Fläche.

(und Drehung) erwartete man eine durch sich selbst hindurchfallende pulsierende Kugel! Durch einen Vorgang, der als „heftige Relaxation“ bezeichnet wird, sind die Schwingungen gedämpft und es bildete sich schnell ein luftiges Gebilde von der *halben* Größe der ursprünglichen Wolke. Wir haben es mit einer Art „Reibung“ ohne Wärmeentwicklung zu tun! Der hier geschilderte Vorgang trafe auf stoßfreie *dunkle* Materie zu. Die kennt keine wirkliche Reibung.

Ein Stern ist nicht bloß halb so groß wie seine Ursprungswolke, er ist Zehnmillionenfach kleiner! Damit so ein „Punkt“ möglich wird, ist immens viel Reibung vonnöten! Der Zusammenbruch der Wolke muss im letzten Moment unumkehrbar aufgehalten⁴ werden! Das gelingt nur mit gewöhnlichem Gas, dessen Atome und (zweiatomigen) Moleküle durch Stöße einen Druck aufbauen können, der sich der Schwerkraft widersetzt. Der freie Fall wird in Stoßfronten schlagartig abgebremst. Die plötzliche Hitze stört und muss schnellstens 'raus ins All. Protosterne verraten sich durch ihre Wärmestrahlung.

Wegen der Drehimpulserhaltung endet der Kollaps vorerst in einer rotierenden Scheibe. Magnetisch vermittelte Reibung besorgt den Abtransport von störendem Drehimpuls radial nach draußen. Im Gegenzug kann drehimpulsabgereichertes Scheibenmaterial nach innen strömen und weiter am Stern bauen. Was von der Scheibe übrigbleibt, dient als Baumaterial für Planeten und deren Monde.

Auch danach, im gesetzten Stern, schreitet der Verdichtungsprozess zumindest innerlich voran. Der Sternstoff zwingt sich, schwerkraftbedingt, in ein immer kleineres Volumen und wird dabei (Kompressionswärme!) immer heißer. Weil es draußen, im Weltenraum, kalt ist, verpufft Energie ins All. Der Stern strahlt. Dadurch aber sackt er weiter in sich zusammen, wird noch heißer. Dieser Teufelskreis hat einen Namen: gravo-thermische Katastrophe. So etwas widerfährt selbstgravitierenden Kugeln, egal, ob es sich um gasförmige Sterne handelt oder Kugelsternhaufen. Nun haben wir das Geheimnis gelüftet, warum unter Einfluss der Schwere das Streben nach Temperaturausgleich das glatte Gegenteil bewirkt. Diese Dinge haben eine „negative“ Wärmekapazität! Sie werden bei Energieverlust heißer! Setzen Kernreaktionen ein, pausiert der Verdichtungsprozess für eine Weile, weil die Abstrahlung nicht mehr durch das Anzapfen von Gravitationsenergie gedeckt werden

⁴Lassen Sie etwas fallen, haben sie das gleiche Problem. Ohne Reibung, also Entropieerzeugung, bliebe der Gegenstand niemals am Boden liegen. Er müsste sich wieder erheben.

muss. Die Abnormalität der Wärmekapazität wirkt sogar stabilisierend. Geht der thermonukleare Reaktor zufällig durch und pumpt zuviel Energie in den Stern, *kühlt* dies das Sterninnere, wodurch prompt die Reaktionsrate abflaut. Die Sonne kann gar nicht thermonuklear explodieren!

Übergewichtigen Sternen wird am Ende eines kurzen Lebens „der Boden entzogen“. Ihr Inneres sackt dann in Sekundenbruchteilen in sich zusammen. Damit ein Neutronenstern entstehen kann, muss die freiwerdende Energie sofort veräußert werden. Als Entsorger fungieren Neutrinos. Das wenige an Bildungswärme, das im Reststern hängenbleibt, reicht, diesem den Garaus zu machen. Jede Supernova gibt Kunde davon, dass wieder einmal erfolgreich nützliche Energie unumkehrbar entwertet wurde.

Natur betreibt Entropiemaximierung. Auf Erden läuft das auf gleichmacherische Unordnung hinaus, den Abbau aller nutzbaren Unterschiede. Deshalb dachte man, das Universum ginge unausweichlich dem „Wärmetod“ entgegen. Dieses trostlose Schicksal hatte ihm 1854 der Potsdamer Hermann von Helmholtz (1821–1894) zgedacht gehabt. Was er nicht ahnte: Spielt die Schwerkraft mit, gibt es kein Entropiemaximum! (Einen Vorgeschmack davon erfährt ein heimkehrender Astronaut. Sein Gefährt gewinnt an Fahrt, tritt der auf die Bremse!) Den Zwang zur Entropiemaximierung schreckt selbst *unendliche*⁵ Dichte nicht. Deshalb das schwarze Loch!

Lässt der Newtonsche Mechaniker ein Probeteilchen aus dem Stand (und fast ohne Drehimpuls) auf einen Massepunkt zufallen, wird jenes haarscharf an diesem vorbeistürzen und genau beim Startabstand zum vorläufigen Stillstand kommen. Der Vorgang ist – da reibungsfrei – zeitumkehrbar. Bei einem schwarzen Loch ist es aus mit der Umkehrbarkeit. Das Teilchen fällt hinein – und verschwindet. Schwarze Löcher sind die mit Abstand schlimmsten Energieentwerter⁶.

Sollten Sie meinen, das war's, irren Sie: Entropie verdoppelt⁷ sich schlagartig,

⁵Da dies für den außenstehenden Physiker unzumutbar wäre, verbirgt sich das Schreckliche, die Singularität, gnädig hinter einem Ereignishorizont. Es gibt keine „nackten“ Singularitäten, also auch keinen Bedarf, diese physikalisch korrekt beschreiben zu müssen!

⁶Was Entropie besitzt, hat auch Temperatur. Allerdings ist die Temperatur schwarzer Löcher unmessbar niedrig. Schwarze Löcher markieren theoretisch die kältesten Stellen im Weltenraum. Je größer, desto kälter. Sollte eines fernen Tages die Umgebung kälter als das schwarze Loch werden, muss das schwarze Loch mehr abstrahlen als es von außen zugestrahlt bekommt. Es verdampft. Und wieder steigt die Entropie

⁷Die Entropie eines schwarzen Lochs wächst mit der Fläche des Ereignishorizonts. Beim Verschmelzen addieren sich die Massen, also die Radien. Nach dem binomischen Lehrsatz

verschmelzen zwei gleichschwere schwarze Löcher . . . Die Erschütterung des Raum-Zeit-Gefüges breitet sich als Gravitationswelle aus, des Universums Entropie vermehrend.

Es ist der Fall ins Bodenlose, der nützliches Gefälle über die Äonen aufrecht-erhält und tödlichen Ausgleich verhindert. Das macht des Daseins „Mühlen“ klappern! Am Anfang war das Niedrig-Entropie-Universum, eine höchst unwahrscheinliche Angelegenheit. Wir werden auf diesen Spezial- und Glücksfall zurückkommen.

Eine entropische Kraft

Vermutlich geht es Ihnen wie mir: Die Entropie kommt einem wie ein Gespenst vor, abstrakt und unwirklich. Das ist kein Wunder. Sie ist eine Ausgeburt der mathematischen Statistik! Kann man sie spüren? Dehnen Sie einen Gummi! Die Zugkraft entsteht beim Versuch, die kettenförmigen Makromoleküle zu strecken. Aber da ist weit und breit keine Zugfeder! Denken Sie sich eine Kette aus *starren* Stäben, die durch reibungsfreie Gelenke miteinander verbunden sind. Moleküle prasseln unablässig gegen die Kettenglieder. Die Kette ändert ständig ihre Gestalt. Mal ist sie länger, mal kürzer. Der Zustand maximaler Länge, d. h. alle Kettenglieder längs einer Geraden ausgerichtet, ist der unwahrscheinlichste. Es gibt nur eine einzige Möglichkeit, ihn zu verwirklichen. Ein Kettenknäuel ist viel wahrscheinlicher! Es wird sich im zeitlichen Mittel ein gewisser Abstand zwischen Anfangs- und Endpunkt einstellen, der statistisch schwankt. Nun kommen Sie und ziehen an der Kette. Die geht notgedrungen in einen weniger wahrscheinlichen Zustand über. Die zufälligen Stöße aber arbeiten, ohne Absicht, auf den wahrscheinlichsten Zustand hin. Was Sie spüren, ist die Kraft⁸ des Zufalls, den Hang zum Wahrscheinlicheren, Entropie eben.

übertrifft die Oberfläche des neuen Lochs auf jeden Fall die Summe beider Einzeloberflächen: $(r_1 + r_2)^2 = r_1^2 + r_2^2 + 2r_1r_2$. Die Entropie wird im Extremfall verdoppelt.

⁸Unter Physikern geht das Gerücht um, die Schwerkraft selbst sei nichts anderes als ein Entropie-Effekt.